

## Blockdiagramme der atlantischen Zirkulation auf Grund der „Meteor“-Ergebnisse.

Von Georg WUST.

Am 16. April 1950 jährte sich zum 25. Mal der Tag der Ausfahrt der Deutschen Atlantischen Expedition auf dem Forschungsschiff „METEOR“, der nach dem Plan von Alfred MERZ als Hauptaufgabe „die Bearbeitung des Problems von der allgemeinen Horizontal- und Vertikalzirkulation der ozeanischen Wassermassen“ (1) gestellt war. Dieses Ereignis gab dem Verfasser die Veranlassung zu dem vorliegenden Versuch, die ozeanographischen Hauptergebnisse der Expedition in anschaulichen graphischen Darstellungen zusammenzufassen, die auf den ersten Blick räumliche Vorstellungen von den Ausbreitungs- und Vermischungsvorgängen der atlantischen Wassermassen vermitteln. Hierfür empfahl sich die Methode der Blockdiagramme, die zwar stark schematisch bleiben müssen, von denen aber gefordert werden kann, daß sie den wesentlichen Zügen der räumlichen Zirkulation gerecht werden. Solche Raumbilder werden wahrscheinlich auch für Biologen/ Geographen und Geophysiker von Nutzen sein, die sich nicht in die zahlreichen Details der Schichtung und Zirkulation, welche der umfangreiche Band VI des Expeditionswerkes (2 und 3) enthält, versenken können, aber die Wesenszüge dieser planetarischen Erscheinungen aus einer graphischen Darstellung zu entnehmen wünschen.

Die Methode der Blockdiagramme, die eine „Art Vereinigung von Profil und Seitenansicht aus der Vogelperspektive“ (4) darstellt, wird in der geographischen Morphologie, nachdem seit der Jahrhundertwende W. M. DAVIS und seine Schule (5 und 6) meisterhafte Entwürfe vorgelegt haben, ausgiebig und mit Erfolg angewandt und hat zweifellos wesentlich zum Verständnis morphologischer Vorgänge und zur Entwicklung der Morphologie überhaupt beigetragen. Auch in der Geologie (vor allem in der Tektonik) hat sich diese Methode bewährt, wie u. a. besonders die zeichnerisch hervorragenden Blockbilder von H. CLOOS (7 u. 8) bewiesen haben. In der Ozeanographie, wo eigentlich ein besonderes Bedürfnis für solche räumlichen Veranschaulichungen vorliegen sollte, ist bemerkenswerterweise bisher kaum von der Methode der Blockdiagramme Gebrauch gemacht worden, was im Grunde darauf zurückzuführen ist, daß man erst seit der „METEOR“-Expedition von dem Verfahren der Aufnahme isolierter Stationen und Profile bei einmaligen Überquerungen der Ozeane abgekommen und zur systematischen Aufnahme ganzer Ozeanräume durch ein Netz von Profilen und Stationen übergegangen ist. Es liegen bisher nur drei Versuche vor, die ozeanische Oberflächen- und Tiefenzirkulation in schematischen Blockdiagrammen darzustellen. 1909 hat W. BRENNECKE (9) im „Planet“-Werk zum ersten Male eine Art Blockdiagramm entworfen, das im Vordergrund eine schematische Darstellung der meridionalen Tiefenzirkulation auf der Ostseite des Atlantischen Ozeans und zugleich in perspektivischer Verkürzung ein Schema der Meeresströmungen an der Oberfläche zu geben versucht. 1942 bietet H. U. SVERDRUP (10) in einem Blockdiagramm ein schematisches Raumbild von den antarktischen Zirkumpolarströmungen (zwischen 40° und 65° S an der Oberfläche) und den sich ihnen in der Tiefe (zwischen 0 und 5000 m) überlagernden Querkirkulationen, wobei zugleich der thermische Aufbau, die Wasserkörper, die Stromkonvergenzen und die Lage des physikalischen Meeresniveaus angedeutet sind.

Schließlich hat der Verfasser (11) 1949 den Versuch unternommen, eine größere Zahl charakteristischer und für das Verständnis der atlantischen Kreisläufe wichtiger Erscheinungen (Strömungen bzw. Ausbreitungsvorgänge nach Richtung und Stärke, vertikale Salzgehaltsverteilung, Lage der Bezugfläche und des physikalischen Meeresniveaus, Grenze der Warmwassersphäre, Konvergenzen und Auftriebsgebiete) in einem schematischen Blockdiagramm der Tiefenzirkulation auf der Westseite und der Oberflächenströmungen zusammenfassend darzustellen. Man hat sich bei diesem Schema den Ozean längs des westlichen Hauptschnittes, d. h. längs einer S-förmig gewundenen Linie ungefähr am Fuß des Kontinentalabfalls beider Amerika aufgeschnitten zu denken und erkennt bei einem Blick nach Osten bis zu den Kontinentalblöcken Europa-Afrika das System der Oberflächenströmungen und zugleich die Komponenten der Tiefenzirkulation und die Salzgehaltsschichtung innerhalb der Schnittfläche. Aus einem solchen Blockbilde gewinnt man erst eine klare Vorstellung von dem Zusammenwirken von Oberflächenströmungen und Tiefenzirkulation. Es zeigt sich, daß zwischen  $50^{\circ}$  N und  $50^{\circ}$  S infolge der morphologischen Beeinflussung durch die amerikanischen Kontinentalblöcke die Tiefenströmungen wie auch die Oberflächenströmungen in ihrer Richtung praktisch mit der Schnittfläche (Westseite) zusammenfallen, d. h. beide tatsächlich einen vorwiegend meridionalen Verlauf besitzen. Erst polwärts von der südlichen Polarfront (in ca.  $50^{\circ}$  S) fällt diese morphologische Beeinflussung fort, und die im Westschnitt eingetragenen Tiefwasserbewegungen haben hier lediglich den Charakter von schwachen Querkirkulationen bzw. von meridionalen konvektionsartigen Ausbreitungsvorgängen, die den starken und tiefreichenden nach E setzenden Zirkumpolarströmungen überlagert sind.

Unser schematisches Blockdiagramm von 1949 ist wie seine Vorläufer im Grunde nur ein halbräumliches Blockbild, da es nur die Verhältnisse von zwei Seiten des Blockes, nämlich von der Oberfläche (in Verkürzung) und von der Vorderfront (Längsprofil auf der Westseite) zur Darstellung bringt. Es fehlt der Einblick in das Innere des Wasserblocks, der erst eine klare Vorstellung auch von den West-Ost-Unterschieden der Tiefwasserbewegungen, d. h. von ihrer wahren Bewegung im Raume vermitteln kann. Aus diesem Grunde gehen wir nun dazu über, das Blockschema in einzelne Stockwerke zu unterteilen, wobei wir uns zunächst auf die 4 Hauptschichten beschränken wollen. Ferner treffen wir die zwar grobe Vereinfachung, daß wir das S-förmig gestaltete atlantische Tal in unserem Schema als ein längliches Rechteck darstellen, dessen Vorderfront von dem in Wahrheit gleichfalls S-förmig verlaufenden westlichen Hauptschnitt und dessen Rückfront von den Kontinentalblöcken Europa-Afrika und südlich von ihnen durch den 20. Meridian östl. Länge gebildet werden (die weiß gelassene Fläche in Abb. 1). Diese Orientierung des Blockdiagramms empfiehlt sich aus dem Grunde, weil, wie das „Meteor“-Werk in Band VI gelehrt hat, alle Glieder der atlantischen Tiefenzirkulation zwischen etwa  $50^{\circ}$  N und  $50^{\circ}$  S ihre Hauptentwicklung auf der Westseite des Ozeans finden und zwar in einer vermittelnden Lage, wie sie durch den Hauptschnitt (etwa am Fuße des Kontinentalabfalls beider Amerika) repräsentiert wird.

#### Die räumliche Zirkulation in 4 Stockwerken.

In Tafel I ist — unter den angegebenen Vereinfachungen — der atlantische Ozean blockartig in die 4 Stockwerke von 0—800 m, 800—2000 m, 2000—4000 m und 4000—6000 m Tiefe aufgeschnitten, wodurch in schematischer Weise die Schichtungs- und Zirkulationsverhältnisse der Deckschicht, der Zwischenschicht, der Tie-

fenschicht und der Bodenschicht räumlich erfaßt werden können. Die Schichtung ist durch die Verteilung des Salzgehaltes in der Horizontalen und der Vertikalen charakterisiert, und zwar sind die (ausgezogenen) Hauptisohalinen für 34,5, 35,0, 35,5, 36,0, 36,5 und 37,0 ‰ und die (gestrichelten) Nebenisohalinen für 34,7, 34,8, 34,9, 35,1 und 35,2 ‰ gezeichnet. Bezüglich der Zirkulation der Wassermassen ist nur eine grobe Unterscheidung in konvektionsartige Ausbreitung, stromartige Ausbreitung von weniger als 10 cm/sec und stromartige Ausbreitung von mehr als 10 cm/sec vorgenommen. Bei Betrachtung der 4 Blockdiagramme ist zu bedenken,

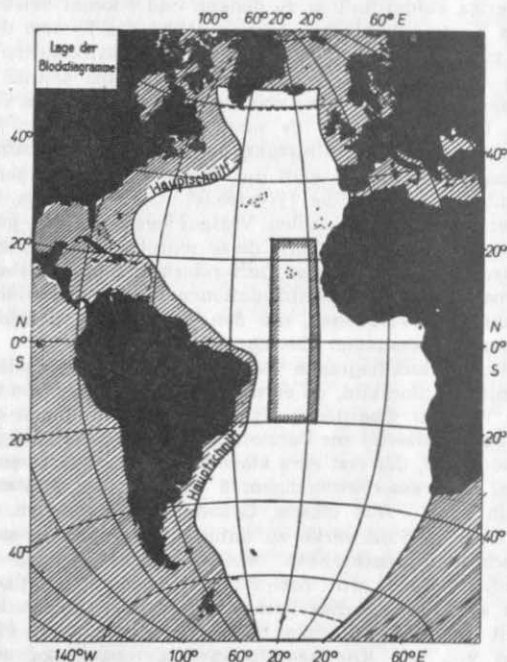
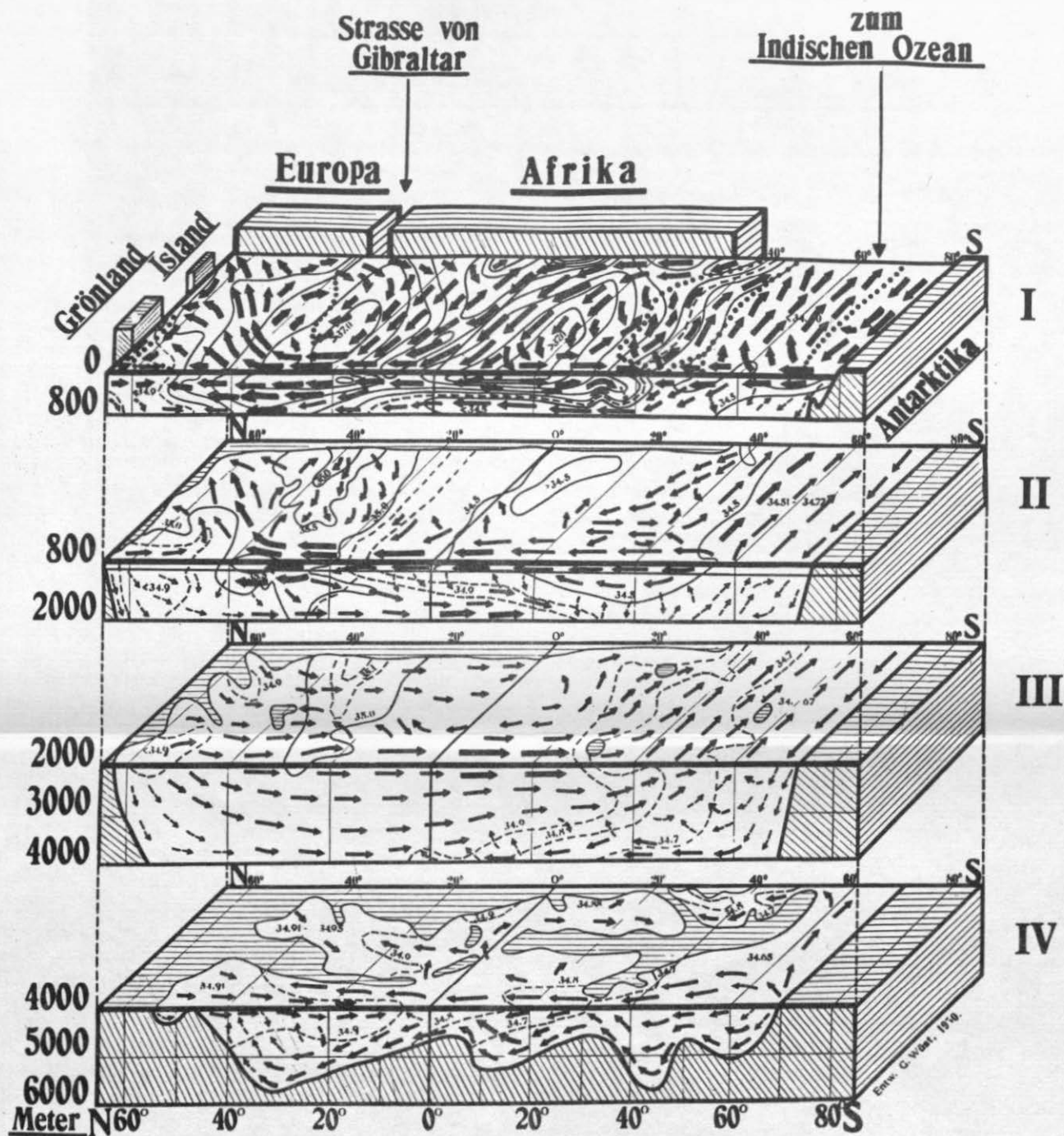


Abb. 1. Die in den Blockdiagrammen dargestellten Ausschnitte aus dem Atlantischen Ozean. Auf den großen weiß gelassenen Ausschnitt beziehen sich die Zirkulationsschemata in Tafel I und Abb. 3 (0—6000 m, Nordwinter). Für den kleineren rechteckigen Ausschnitt ist in Abb. 2 die Warmwasserzirkulation (0—200 m) im Nordsommer dargestellt.

daß der vertikale Maßstab gewaltig — etwa 1300-fach — übertieft ist und daß sich in Wahrheit die Zirkulationen — verglichen mit den Dimensionen unseres Planeten — in ganz dünnen Wasserfilmen abspielen und die vertikalen Komponenten ganz hinter den horizontalen zurücktreten.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die Blockdiagramme wirken noch wesentlich plastischer, wenn man die einzelnen Salzgehaltsstufen nach folgender Skala mit Buntstift anlegt: > 36,0 rot, 35,0—36,0 helles gelbliches rot, 34,8—35,0 hellgelb, 34,5—34,8 hellgrün, < 34,5 hellblau.



Blockdiagramme der atlantischen Zirkulation zwischen 0 und 6000 m (Nordwinter) in 4 Stockwerken  
(I Deckschicht, II Zwischenschicht, III Tiefenschicht, IV Bodenschicht).

- stromartige Ausbreitung > 10 cm/sek  
 → dgl. < 10 cm/sek  
 → konvektionsartige Ausbreitung
- ..... Stromkonvergenzen  
 --- Isohalinen

An der Oberfläche sind in perspektivischer Verkürzung und schematisiert die vorwiegend zonalen Meeresströmungen entsprechend den mittleren Verhältnissen des Nordwinters und mit den wichtigsten Konvergenzen (Polarfronten, subtropische Konvergenzen) dargestellt, und zwar ohne Unterscheidung der Stromstärken, die sämtlich größer als 10 cm/sek angenommen werden können. Es ist besonders zu beachten und für das Verständnis der Tiefenzirkulation in unserem Schema wichtig, daß auf der Westseite zwischen etwa 40° N und 50° S die Oberflächenströmungen (wie hier auch die Tiefwasserbewegungen) vorwiegend meridional verlaufen und daß ihre Richtung weitgehend mit der gewundenen Richtung unsrer Schnittfläche (Hauptschnitt) zusammenfällt; zwischen 20° N und 40° N verläuft unser Schnitt längs der rechten Flanke des Golfstromsystems, also dort, wo die lateralen Wirkungen dieses stärksten Gefällstromes des Ozeans besonders tief reichen. Polwärts von 40° N und polwärts von 50° S werden hingegen die hier mehr zonal verlaufenden Oberflächenströmungen — besonders im antarktischen Wasserring — senkrecht von unserem Längsprofil geschnitten. Bemerkenswert ist der ständige Übertritt südatlantischer Wassermassen über den Äquator im Südäquatorialstrom. Der äquatoriale Gegenstrom ist nur schwach angedeutet, da er im Nordwinter rudimentär entwickelt ist. Die horizontale Verteilung des Salzgehaltes an der Oberfläche hängt bekanntlich in erster Linie von der zonalen Verteilung von Verdunstung minus Niederschlag ab, woraus sich die Lage der subtropischen Salzgehaltsmaxima ( $> 37.0 \text{ ‰}$ ) und des äquatorialen Salzgehaltsminimum ( $< 35.5 \text{ ‰}$ ) erklärt. Aber unser Schema läßt an vielen Stellen erkennen, daß die Oberflächenzirkulation modifizierend in die Salzgehaltsverteilung eingreift. Südlich der südlichen Polarfront finden wir als Folge des polaren und subpolaren Klimas (Eisschmelze, negative Werte von  $[V-N]$ ) sehr geringe Salzgehalte von  $< 34.0 \text{ ‰}$ . Hieraus leitet sich das subantarktische Zwischenwasser her, das an der Polarfront auf 600—800 m Tiefe absinkt und sich etwa in diesem Niveau über den Äquator bis ca. 20° N ausbreitet, wie unser Westschnitt lehrt. Auf der Nordhemisphäre reichen in der Deckschicht besonders zwischen 30° N und 40° N die starken Strömungen des Golfstromsystems bis über 800 m Tiefe hinab. Hier auf der Westseite treten die von Defant abgeleiteten schwachen thermohalinen Zirkulationen der Warmwassersphäre, die im zentralen und östlichen Teil der äquatorialen Zone besonders während des Nordsommers 4 Zirkulationszellen umfassen, nicht in Erscheinung. Wir werden uns weiter unten mit dieser Warmwasserzirkulation noch näher befassen.

Aus dem Blockdiagramm der Zwischenschicht wird ersichtlich, daß — in Übereinstimmung mit der dynamischen Bearbeitung DEFANT's (3) und mit der später noch zu behandelnden Kernschichtmethode — in 800 m Tiefe im Bereich des salzarmen subantarktischen Zwischenwassers zwischen 40° S und 20° N die Tiefwasserbewegungen vorwiegend meridional nach N verlaufen und sich mehr und mehr auf der Westseite des Ozeans konzentrieren, während die zentralen und östlichen Teile des Ozeans zwischen 20° N und 30° S als praktisch stromlos anzusehen sind. Nördlich von 20° N machen sich in diesem Niveau von 800 m vor allem die starken Tiefenströmungen des Golfstromsystems bemerkbar und von der Straße von Gibraltar ausgehend bereits die Einstömungen salzreichen Mittelmeerwassers. Ganz im NW des Nordatlantischen Ozeans sehen wir die — zwar sehr rudimentäre — Entwicklung des subantarktischen Zwischenwassers, das infolge der Vermischung mit Ausläufern des Golfstromsystems durch relativ hohe Salzgehalte (von 34.9—35.0 ‰) gekennzeichnet ist. Südlich von 50° S machen sich die tiefreichenden Zirkumpolarströmungen, die senk-



recht zum Hauptabschnitt nach E gerichtet sind, stark bemerkbar. Im unteren Teile der Schicht 800—2000 m zeigen sich im Nordatlantischen Ozean bis 20° S bereits die nach S setzenden Tiefwasserbewegungen des Nordatlantischen Tiefenwassers.

In dem nächsten Stockwerk — der Tiefenschicht — finden wir vorwiegend meridionale Strömungen nach S, welche das in den grönländischen Gewässern abgesunkene und auch durch die mittelmeerische Zuströmung aus der Straße von Gibraltar gespeiste salzreiche nordatlantische Tiefenwasser über den Äquator bis in hohe Südbreiten verfrachten. Das hauptsächlich auf der dynamischen Bearbeitung DEFANT's beruhende Stromfeld in 2000 m zeigt wiederum eine Bevorzugung der Westseite bei den meridionalen Wasserversetzungen. Südlich von 40° S überwiegen hingegen noch die zonalen zirkumpolaren Strömungen nach E, denen schwache konvektionsartige Querkirkulationen mit einem Anstieg des nordatlantischen Tiefenwassers überlagert sind und die erst wahrscheinlich in ca. 3000—3500 m Tiefe zum Erlöschen kommen. Unmittelbar vor dem Kontinentalabfall Antarktikas tritt in der Schicht 2000—4000 m bereits das Absinken des antarktischen Bodenwassers in Erscheinung, aus dem sich der nach N setzende antarktische Bodenstrom herleitet.

Daß dieses kälteste und schwerste Wasser der atlantischen Tiefenzirkulation seine bevorzugte Ausbreitung ebenfalls in der Westhälfte findet, lehrt das Blockdiagramm der Bodenschicht (4000—6000 m). Die Hauptquelle dieser Wasserart liegt ganz im SW des Südatlantischen Ozeans in der Weddellsee. In die Ausbreitung des antarktischen Bodenstroms, die sich auch in der Verteilung des Salzgehaltes widerspiegelt, greift neben der Corioliskraft in entscheidender Weise das Relief des Tiefseebodens ein: die Zweiteilung der Tiefsee durch den atlantischen Zentralrücken und die Unterteilung der beiden Mulden durch Querriegel, besonders durch den Walfischrücken, der den antarktischen Bodenstrom in der Ostmulde bereits in einer Diagonale zwischen 40° und 20° S abriegelt. In der Westmulde finden wir ihn hingegen in großartigster Entwicklung, reichend bis 40° N und dabei bis 10° N sich ganz an die Westseite des Ozeans anlehnend. Nördlich von 10° N machen sich in 4000 m noch die Wirkungen des nach S setzenden nordatlantischen Tiefenstroms bemerkbar, dessen untere Partien als eine Art Gegenstück zum antarktischen Bodenstrom aufgefaßt werden können. Klar tritt uns in unserem Schema auch die Bedeutung der 2 Durchbrechungen des atlantischen Zentralrückens am Äquator (Romanche-Rinne) und in 8° N entgegen, durch welche Ausläufer des westatlantischen antarktischen Bodenstroms in die Ostmulde gelangen und hier, nach S und N ausstrahlend, noch gewisse antarktische Beeinflussungen bis ca. 30° N und 30° S ausüben. Aus dem Längsprofil zwischen 4000 und 6000 m wird die morphologische Beeinflussung des antarktischen Bodenstroms durch Südsandwich-Schwelle, Rio-Grande-Schwelle und Pará-Schwelle ersichtlich.

Unsere 4 Blockdiagramme vermitteln eine räumliche und in sich geschlossene Vorstellung von den weitreichenden mittleren Ausbreitungs- und Vermischungsvorgängen des Atlantischen Ozeans, d. h. von den Kreisläufen der atlantischen Wassermassen, in denen alle Übergänge von konvektionsartiger Ausbreitung bis zu den stärksten Meeresströmungen existieren. In den Strompfeilen und in der Verteilung des Salzgehaltes tritt uns klar die zum Äquator ganz asymmetrische Anordnung von Zirkulation und Schichtung entgegen. Es handelt sich im wesentlichen um einen Austausch von antarktischen und nordatlantischen Wassermassen, der sich quer über den Äquator von Hemisphäre zu Hemisphäre und ganz überwiegend auf der Westseite vollzieht. Arktische Komponenten spielen eine

ganz untergeordnete Rolle infolge der orographischen und morphologischen Gegebenheiten des Ozeans. Für die Entstehung des salzreichen nordatlantischen Tiefenwassers ist die Existenz des salzreichen Mittelmeeres von ausschlaggebender Bedeutung. Durch den auf der Westseite nach S setzenden nordatlantischen Tiefenstrom erfolgt die Kompensation für den ständigen Übertritt südhemisphärischer Wassermassen über den Äquator, der an der Oberfläche, im subantarktischen Zwischenstrom und im arktischen Bodenstrom ebenfalls in der Westhälfte erfolgt. Jedoch ist zu beachten, daß bereits im Südatlantischen ein beträchtlicher Teil der beiden antarktischen Wassermassen sich mit dem entgegengesetzt vordringenden nordatlantischen Tiefenwasser vermischt und mit diesem zur Antarktis zurückkehrt, was wir in unserem Schema durch rückkehrende Pfeile angedeutet haben. Durch die Zirkumpolarströmung werden im antarktischen Wasserring Ausläufer des nordatlantischen Tiefenwassers der indopazifischen Kaltwasserphäre zugeführt. Auch die Temperaturverhältnisse am Tiefseeboden der beiden Nachbarozeane weisen auf eine starke atlantische Beeinflussung hin. Es handelt sich also um Kreisläufe wahrhaft planetarischen Ausmaßes, bei denen sich Ausbreitung und Vermischung die Waage halten. Die treibenden Kräfte für die Inganghaltung dieser großen Kreisläufe liegen erstens in den Winden, die ihre Energien an die Wassermassen und in den höheren Breiten bis zu erheblichen Tiefen abgeben und zweitens in den unterschiedlichen Einwirkungen der polaren und subpolaren Klimate in N- und S-Hemisphäre auf den thermohalinen Aufbau, die im Winter bis zum Boden der Tiefsee reichen, und schließlich in der salzreichen Einstromung aus dem Mittelmeer.

#### Blockdiagramme der Warmwasserzirkulation.

Wegen der Lage des Hauptschnittes, der Jahreszeit und der geringen Mächtigkeit der Warmwassersphäre tritt in Tafel I das Wesen der Warmwasserzirkulation, wie es von DEFANT (12) im „Meteor“-Werk für den zentralen und östlichen Teil des tropischen Atlantischen Ozeans abgeleitet wurde, nicht in Erscheinung. Um diese auch biologisch bedeutsamen Zirkulationsvorgänge räumlich zur Darstellung zu bringen, konstruieren wir Raumbilder für einen kleineren rechteckigen Wasserblock, der nach den Seiten durch die beiden Meridiane von 30° W und 18° W und durch die Breitengrade von 25° N und 20° S sowie nach der Tiefe durch den Horizont von 200 m begrenzt ist (Abb. 1). Dieser Block wird noch einmal aufgeschnitten durch die gewellte Kernschicht des tropischen Salzgehaltsmaximums, die sich um das 100-m-Niveau auf- und abbewegt und aus der man, wie DEFANT gezeigt hat, ein klares Bild erhält von den Strömungsverhältnissen in den Unterschichten der Warmwassersphäre.

Da die Lage des physikalischen Meeresniveaus aus dynamischen Gründen in gesetzmäßiger Beziehung zur Warmwasserzirkulation mit ihren Divergenzen und Konvergenzen steht, haben wir in unseren Blockdiagrammen (Abb. 2) in starker Übertreibung auch die Krümmungen der Meeresoberfläche dargestellt. Die Oberflächenströmungen zeigen in schematischer Weise die Verhältnisse des Nord-sommers, wo der äquatoriale Gegenstrom am stärksten ausgebildet ist. Die Südgrenze des Gegenstroms in 4° N wird durch eine Konvergenzlinie gebildet. Eine Divergenzlinie, diagonal verlaufend, zwischen 10° N und 17° N, begrenzt den Nord-äquatorialstrom nach S, eine weitere Divergenzlinie tritt am Äquator im Süd-äquatorialstrom auf. An diese beiden Divergenzen der Oberfläche knüpfen sich zwei Tieflagen des physikalischen Meeresniveaus, an die Konvergenz eine Auf-

wölbung. Die Kernschicht des tropischen Salzgehaltsmaximums zeigt ein zur Meeresoberfläche inverses Verhalten, sowohl was die Topographie als auch die Unstetigkeitslinien anlangt: in 0° und um 10° N zwei Aufwölbungen mit Konvergenzen, in 5° N eine Einsattelung und Divergenz.

Mit diesen Erscheinungen sind die Stromfelder an der Oberfläche und in den Unterschichten der Warmwassersphäre innig verknüpft, wie unsere Raumbilder veranschaulichen. Bei ihrem starken Fließen nach W nehmen der Nordäquatorial-

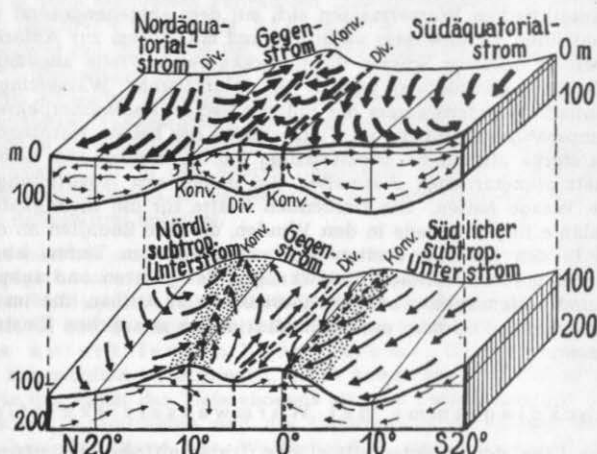


Abb. 2. Blockdiagramme der atlantischen Warmwasserzirkulation in 0—200 m Tiefe (Nordsommer).

Strombild in der Unterschicht abgeleitet aus der Salzgehaltsverteilung in der Kernschicht des intermediären Salzgehaltsmaximums.

Die punktierten Flächen bezeichnen die Konvergenzgebiete ohne Salzgehaltsmaximum.

Lage der Kernschicht des Salzgehaltsmaximums maßstäblich richtig (bei der gewählten starken Übertiefung des Schnittes).

Lage der Meeresoberfläche noch 100-fach überhöht.

---- Konvergenz- bzw. Divergenzlinien.

strom und bis zum Äquator auch der Südäquatorialstrom mehr und mehr eine schwache, polwärts gerichtete meridionale Komponente (nach N bzw. S) an, die subtropischen Unterströme weisen hingegen schwache äquatorwärts gerichtete Komponenten auf. Hieraus ergeben sich in der Vertikalen zwei schwache Querkirkulationen mit aufsteigenden Bewegungen am Äquator und in ca. 10°—15° N und mit absteigenden Bewegungen in den Subtropen (um 30° N und S). Die beiden Auftriebsgebiete bilden die Grenzen für die äquatorwärts gerichteten Vorstöße subtropischen Wassers in der Kernschicht, um sie legt sich je ein streifenförmiges Gebiet ohne Salzgehaltsmaximum (in Abb. 2 punktiert). Zwischen diesen beiden Streifen tritt das intermediäre Salzgehaltsmaximum wieder kräftig entwickelt auf, was aus einem Einschub salzreichen Wassers in der Tiefe von W her durch den äquatorialen Gegenstrom zu erklären ist. Zwischen dem Äquator und der Südgrenze des Nordäquatorialstromes haben wir 2 symmetrisch (zum 4. Breitengrad



nördl. Breite) angeordnete Querkirkulationen mit absteigenden Ästen in der Mitte und aufsteigenden an den Rändern. Die nördliche Querkirkulation knüpft sich an den Gegenstrom, die südliche an den Teil des Südäquatorialstromes, der über den Äquator nach NW herübergetreten ist. So finden wir in der Vertikalen zwischen ca. 30° N und 30° S insgesamt 4 Zirkulationszellen, deren Symmetrieachse nicht durch den Äquator, sondern durch die Südgrenze des äquatorialen Gegenstroms in ca. 4° N gebildet wird. Jedoch unsere Blockdiagramme lehren, daß niemals ein Wasserteilchen einen solchen vertikalen Kreislauf ausführt, sondern daß die wahren Bewegungen schraubenförmig in langgestreckten (zonal gerichteten) Raumkurven erfolgen mit einem Aufstieg längs den Divergenzlinien und einem Abstieg längs den Konvergenzlinien der Oberfläche. Die Auftriebsgebiete sind Maximalgebiete der Nährstoffzufuhr und daher auch der Planktonproduktion, in den Absinkgebieten haben wir hingegen mit verbrauchtem Wasser und verminderter Planktonerzeugung zu rechnen, was auch durch die Beobachtungen von HENTSCHEL und WATTENBERG (13 und 14) bestätigt wird. Unterhalb der Kernschicht des Salzgehaltsmaximums sind die Verhältnisse sehr gleichförmig, und es fehlt ein ausgeprägtes Zirkulationssystem. Die treibenden Kräfte der zonalen Warmwasserzirkulation sind die Luftströmungen, besonders die beiden Passate. Die schwachen meridionalen Zirkulationen sind auf die orographischen Einflüsse (Küstenkonfiguration), Unterschiede der Strahlung und der Größe V—N zwischen dem meteorologischen Äquator und den Roßbreiten zurückzuführen. Sie reichen nicht tief, aber tragen zur Ausbildung des merkwürdigen thermohalinen Aufbaus maßgeblich bei, der für die Warmwassersphäre zwischen 25° N und 20° S charakteristisch ist.

#### Räumliche Ausbreitung der Hauptwasserarten der Kaltwassersphäre in ihren Kernschichten.

Aus Tafel I geht bereits hervor, daß die Hauptausbreitung der Hauptwasserarten der Kaltwassersphäre nicht in horizontalen Ebenen erfolgt, sondern in gekrümmten Flächen, die wir als Kernschichten bezeichnet haben. Bei der qualitativen Bearbeitung der Schichtung und Zirkulation hat sich im „Meteor“-Werk die Kernschichtmethode als besonders nützlich erwiesen. Diese Methode besteht darin, daß man die Ausbreitung und Vermischung der klar definierten Hauptwasserarten der Kaltwassersphäre von ihren Ursprungsgebieten bis zu den letzten Spuren in den Schichten verfolgt, die durch weitverbreitete intermediäre Maxima oder Minima geeigneter hydrographischer Faktoren ausgezeichnet sind. Wir unterscheiden in der atlantischen Kaltwassersphäre vier Kernschichten:

1. Kernschicht des subantarktischen (und des subarktischen) Zwischenwassers, gekennzeichnet durch das intermediäre (und zugleich absolute) Salzgehaltsminimum. Tiefenlage schwankend zwischen ca. 500 und 1000 m Tiefe.
2. Kernschicht des Mittelmeerwassers und des oberen nordatlantischen Tiefenwassers, gekennzeichnet durch das intermediäre Salzgehaltsmaximum. Tiefenlage schwankend zwischen etwa 1000 m und 2750 m.
3. Kernschicht des mittleren nordatlantischen Tiefenwassers, gekennzeichnet durch das intermediäre Sauerstoffmaximum. Tiefenlage schwankend zwischen etwa 1500 und 3000 m.
4. Kernschicht des antarktischen (und subarktischen) Bodenwassers, gekennzeichnet durch das absolute Minimum der potentiellen Temperatur am Tiefseeboden. Tiefenlage schwankend zwischen 4000 m und 6000 m.

In Abb. 3 sind nunmehr (für denselben Wasserblock wie in Tafel I) die räumlichen Topographien dieser Kernschichten, die Verteilung ihrer Indikatoren (in 1 und 2 Salzgehalt, in 3 Sauerstoffgehalt, in 4 potentielle Bodentemperatur) und

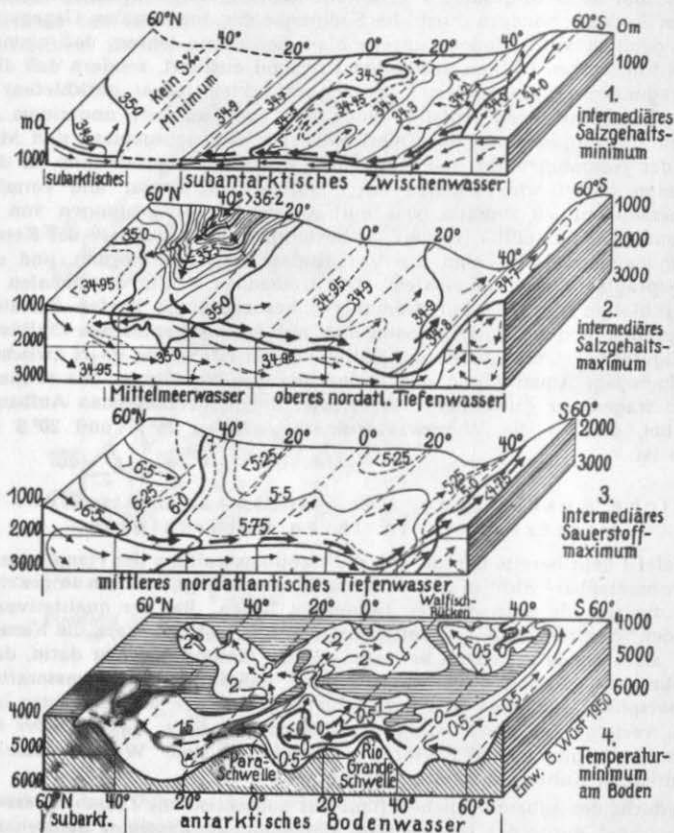


Abb. 3. Räumliche Ausbreitung der Hauptwasserarten der atlantischen Kaltwassersphäre in 4 Kernschichten, dargestellt durch schematische Blockdiagramme.

- Hauptausbreitung
- Abzweigungen

durch Pfeile die Hauptausbreitung der betr. Wasserart (und die Abzweigungen) in Form von Blockdiagrammen schematisch dargestellt. Die hieraus abzuleitenden Zirkulationsbilder stehen in guter innerer Übereinstimmung mit den Stromfeldern von Tafel I, die unabhängig davon auf ganz anderem Wege gewonnen sind, indem

sie auf dynamischen Berechnungen beruhen. Es liegt in der Natur der Sache, daß wir in den Blockdiagrammen der Kernschichten die Ausbreitung der Hauptwasserarten besser verfolgen können als in den würfelförmigen Blockbildern der Tafel I. Erstere geben ein klareres Bild von dem Ursprung, der räumlichen Ausbreitung, der Vermischung und der Reichweite der Hauptwasserkörper in einigen bevorzugten Flächen und bilden daher eine willkommene Ergänzung zu den Hauptschematas in Tafel I. Da wir oben bereits die Hauptzüge der räumlichen Zirkulation aufgezeigt haben und die Kernschicht-Blockdiagramme hiernach ohne weitere ausführliche Kommentare verständlich sind und für sich selber sprechen, wollen wir uns hier nur auf einige ergänzende Bemerkungen beschränken:

In 1 tritt besonders klar die bereits betonte Asymmetrie der subantarktischen und subarktischen Komponenten bei der Bildung und Ausbreitung des Zwischenwassers hervor.

Aus 2 wird vor allem die Bedeutung der salzreichen mittelmeerischen Einstromung (aus der Straße von Gibraltar) für die atlantische Kaltwassersphäre und für die Bildung des oberen nordatlantischen Tiefenwassers ersichtlich, das sich über den Äquator zum südatlantischen Ozean unter ständiger Absenkung bis 40° S ausbreitet, um dann stark ansteigend sich in Ausläufern der antarktischen Zirkumpolarströmung beizumischen.

Das 3. Blockbild lehrt, daß die Durchlüftung der atlantischen Kaltwassersphäre von den grönländischen Gewässern ausgeht und daß sich in der Verteilung des Sauerstoffes in dieser Kernschicht die Ausbreitung des mittleren nordatlantischen Tiefenwassers bis zu den hohen Südbreiten spiegelt.

In 4 ist versucht, die Ausbreitung des antarktischen Bodenwassers mit Hilfe der potentiellen Temperatur am Tiefseeboden in einem Blockbild räumlich darzustellen, was infolge des Dazwischentreitens der Rücken und Schwellen nur unvollkommen gelingt. Auch in diesem Schema wird die gewaltige Asymmetrie der antarktischen und subarktischen Komponenten besonders deutlich.

In allen 4 Kernschichten tritt die bereits betonte Bevorzugung der Westseite des Ozeans bei der räumlichen Ausbreitung der Wasserarten besonders klar in Erscheinung.

Unsere Blockdiagramme sind stark schematisch und stellen lediglich erste Versuche dar, den Stand der Forschung in Bezug auf ein Hauptproblem der Meereskunde, das der atlantischen Zirkulation, anschaulich in Raumbildern darzustellen. Weitere Verfeinerungen sind erforderlich. Die graphische Methode der Blockdiagramme besitzt in der Ozeanographie wie in allen Erdwissenschaften noch viele nützliche Anwendungsmöglichkeiten, und es sei auch hier an die Worte von BERGHAUS (15) erinnert: „Haftet doch kein Eindruck dauernder als derjenige, welcher unmittelbar auf unsere Sinne wirkt; so auch graphische Darstellungen, die uns die Phänomene der physikalischen Geographie übersichtlich vor Augen legen. Sie bringen das erst gleichsam ins Leben, zur lebendigen Anschauung, was in der schriftlichen Darstellung oft als toter Buchstabe verborgen bleibt“. Zur Karte und zum Profil muß in manchen Fällen auch bei Phänomenen des Weltmeeres das Blockdiagramm treten, um zu räumlichen Vorstellungen zu gelangen, besonders, wenn es sich um große Räume handelt. Räumliches Denken spielt nicht nur in der Geologie und physikalischen Geographie, sondern auch in der modernen Ozeanographie eine ausschlaggebende Rolle.

# Literaturverzeichnis:

- 1) MERZ, A.: Die deutsche Atlantische Expedition auf dem Vermessungs- und Forschungsschiff „Meteor“, Sitz. Ber. Pr. Ak. d. Wl. Phys. math. Kl. XXXI Berlin 1925, S. 562—586.
- 2) DEFANT, A. und WUST, G.: Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Wiss. Erg. D. Atl. Exp. „Meteor“, Band VI, 1. Teil, mit Atlas, Berlin 1936.
- 3) DEFANT, A. u. WUST, G.: Quantitative Untersuchungen zur Statik u. Dynamik des Atlantischen Ozeans. Wiss. Erg. D. Atl. Exp. „Meteor“, Band VI, 2. Teil, Lief. 2—5, Berlin 1938—1941.
- 4) WAGNER, H.: Lehrbuch der Geographie. 10. Aufl. I. Band, 1. Teil, Hannover 1920, S. 243.
- 5) DAVIS, W. M. und BRAUN, G.: Grundzüge der Physiographie, Leipzig 1911.
- 6) DAVIS, W. M. und RUHL, A.: Die erklärende Beschreibung der Landformen, Leipzig 1912.
- 7) CLOOS, H.: Einführung in die Geologie. Ein Lehrbuch der inneren Dynamik, Berlin 1936.
- 8) CLOOS, H.: Ein Blockbild von Deutschland. Geolog. Rundschau 31. Bd. Stuttgart 1940, S. 143.
- 9) BRENNECKE, W.: Ozeanographie. Die Forschungsreise S. M. S. „Planet“, III. Band, Berlin 1909.
- 10) SVERDRUP, H. U., JOHNSON, M. W. und FLEMING, R. H.: The Oceans. Their physics, chemistry and biology, New York 1942 und 1946.
- 11) WUST, G.: Die Kreisläufe der atlantischen Wassermassen, ein neuer Versuch räumlicher Darstellung, Forschungen und Fortschritte, 25. Jhrg., Nr. 23/24. Berlin 1949, S. 287—290.
- 12) DEFANT, A.: Die Troposphäre, Wiss. Erg. D. Atl. Exp. „Meteor“, Band VI, 1. Teil, Lief. 3, Berlin 1936.
- 13) HENTSCHEL, E. und WATTENBERG, H.: Plankton und Phosphat in der Oberflächenschicht des Südatlantischen Ozeans. Ann. d. Hydrographie, Band 58, Berlin 1930.
- 14) HENTSCHEL, E.: Allgemeine Biologie des Südatlantischen Ozeans. 1. Lief. Das Pelagial der obersten Wasserschicht. Wiss. Erg. D. Atl. Exp. „Meteor“, Band XI, Berlin 1933.
- 15) BERGHAUS, H.: Allgemeine Länder- und Völkerkunde. Bd. I (Vorwort) 1837.